



TITLE:

地下浸水とその備え

AUTHOR(S):

戸田, 圭一

CITATION:

戸田, 圭一. 地下浸水とその備え. 2013年度 水工学に関する夏期研修会
講義集 Aコース 2013, 49: A-3-1-A-3-14: 13-A-3.

ISSUE DATE:

2013-08

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/193719>

RIGHT:

© 2013公益社団法人 土木学会

地下浸水とその備え

Underground Inundation and Its Measures

戸 田 圭 一

Keiichi TODA

1. はじめに

時間雨量が 100mm に迫る、あるいはそれを上回るような集中豪雨の発生により、都市域を中心に水害が頻発している。降雨という外力の大きさに加えて、都市を含む流域の都市化の進展により、河川の溢水による氾濫（外水氾濫）が発生したり、雨水を下水道や市内河川で処理できずに生じる内水氾濫が大規模化したりしている。

このような洪水氾濫が生じた場合、氾濫水は当然地盤の低いところへ流下する。もしも地下室、地下街、地下鉄駅といった地下空間が氾濫域に存在するならば、地下空間への流入をくい止める手だてがうたれないと、氾濫水は当然、そのような地下空間に浸入し、拡がっていく。ビル地階の比較的小規模な地下室を除けば、地下駐車場、地下街、地下鉄駅などの公共の地下空間は多層でかつ互いが連絡している場合が多く、氾濫水の挙動は地上部のそれよりもはるかに予想しにくい。また地下鉄の軌道部を除くと地上に比べてそれらの空間の容積は一般に小さいため、浸水深の上昇が急激に起こり、市民に危険を及ぼす可能性も地上部よりもはるかに高いと推察される。したがって都市部の地下空間を有効利用するにあたっては、水害による地下空間の危険性をきちんと調べ、適切なハード・ソフトの対策を講じておく必要がある。

ここでは、著者が京都大学の都市水害研究グループの一員として参画してきた地下浸水に関する研究の成果を抜粋して示すとともに、地下浸水への備えについて、少しばかり考えてみることにする。

2. 都市水害時の地下浸水事例

2. 1 地下浸水の事例の概要

振り返るに、洪水氾濫による地下空間の被害は、1982 年の長崎水害や 1993 年の鹿児島水害時に現れている。1982 年 7 月に長崎市およびその周辺で発生した長崎水害は、梅雨前線豪雨の直撃をうけたものであり、市内近郊域での土砂災害が激しかったが、市内中心部でも急流小河川の出水により洪水氾濫が生じた。氾濫水はビルの地下室に流入し、電気系統などに被害を及ぼしている。また、1993 年 8 月の鹿児島水害では、市中心部でも甲突川などの市内河川が各所で氾濫し、氾濫水は繁華街の地下飲食店やビルの地下室にも流入した。水とともに流入した泥のために被害が増大し、地上部以上に清掃や復旧に困難をきわめた。

その後、1999 年 6 月の福岡市での御笠川の氾濫時に、大量の氾濫水が JR 博多駅周辺の地下に流入し、またビルの地階で水死事故が発生したことから、都市水害時の地下浸水の問題が大きくクローズアップされた。2000 年 9 月の東海水害でも地下浸水による被害が発生し、2001 年 7 月には、韓国のソウル市でも日本と同様の地下浸水が発生した。最近でも、規模の大小はあるものの地下浸水が頻発しており、2011 年 9 月には愛知県春日井市の JR 中央線の高蔵寺駅で、2012 年 8 月には大阪府守口市の大阪市営地下鉄大日駅で地下浸水の被害が発生した。

次に、多くの人達に衝撃を与えた 1999 年の福岡市、2001 年の韓国ソウル市での水害時の地下空間の

浸水事例を少し詳しく見ていくことにする。

2. 2 1999 年の福岡市の地下浸水

福岡市では、1999 年 6 月 29 日午前中に時間雨量 77mm を含む集中豪雨に見舞われた。図-1 に、福岡管区気象台で観測された降雨分布を示す。福岡市内各地での内水氾濫の発生の後、市内を流れる御笠川が増大してその一部が溢水し、外水氾濫が発生する事態となった。御笠川の氾濫水は、地盤の低い JR 博多駅周辺に流下していった。溢水箇所ならびに氾濫域を図-2 に示す。

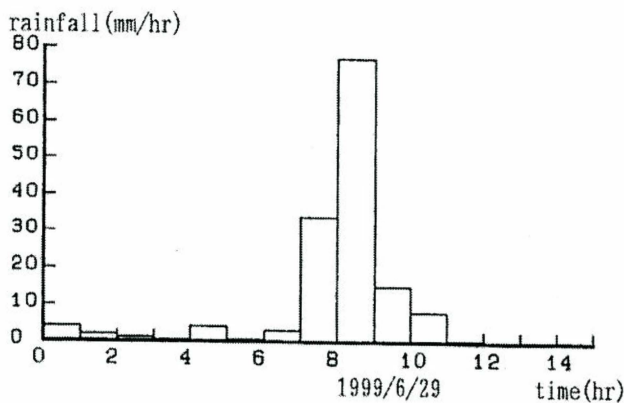


図-1 福岡の降雨分布

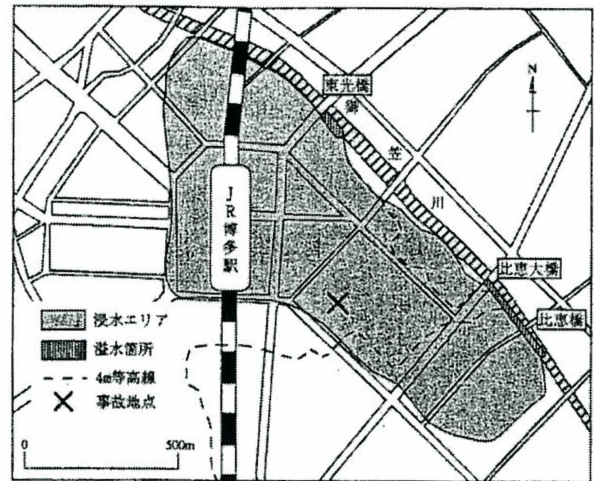


図-2 溢水箇所と氾濫域

JR 博多駅東側の筑紫口には、駅の外に 5 箇所、駅構内に 2 箇所、福岡市営地下鉄「博多駅」に通じる地下鉄の入口がある。博多駅の筑紫口まで達した氾濫水は、これら地下鉄入口から、階段を落ちていく段落ち流れとなって改札口のフロア (B1F) に流れ込んだ。氾濫水は地下鉄ホームから地下鉄軌道にまで浸入し、レールが水をかぶったため、地下鉄は午後 0 時 5 分から午後 3 時 45 分まで博多駅～福岡空港間の運転を見合わせた。排水作業にあたっては、排水能力 $6\text{m}^3/\text{min}$ のポンプを午後 3 時 30 分まで動かし続けた。また駅構内の天井部の破損やエスカレータのモーター部分の損傷といった被害も発生した。筑紫口では、地下鉄構内に隣接する地下 1 階の商店街にも、複数の階段、エスカレータから氾濫水が流入した。天井からの漏水も加わり、商店街の一部では浸水深が 25cm にも達した。また筑紫口周辺のホテルでは、地下室への浸水の影響で電気設備 (空調設備、発電機など) や電話回線の故障が発生した。

さらに、御笠川の比恵橋～比恵大橋の溢水区間と JR 博多駅のほぼ中間に位置する博多駅東 2 丁目のビルで、地下の飲食店にいた女性従業員が、流れ込んできた氾濫水により水死した。このビルの地階全体の床面積は約 730m^2 、天井高は約 3m である。飲食店のとなりは駐車場となっており、スロープのある駐車場入口と地表近くに位置する通気口から短時間のうちに氾濫水が流入し、地下空間がすぐに満杯となり避難できなくなった模様である。

2. 3 2001 年の韓国ソウル市の地下浸水

2001 年 7 月 14 日の深夜から 15 日早朝にかけて、韓国ソウル市は、発達した梅雨前線の影響で激しい集中豪雨に襲われた。ソウル市内の鐘路区気象観測所では、15 日午前 2 時から午前 3 時までの時間雨量 90mm を記録し、14 日午後 2 時から 24 時間雨量が 310mm に達した。降雨の分布を図-3 に示す。この豪雨により、ソウル市内のいたるところで洪水氾濫が発生した。60,000 世帯以上が浸水被害を受けたが、その多くは住宅密集地の地下あるいは半地下タイプの住宅に住む世帯と見られている。また地下鉄駅やバスターミナルの浸水のため、公共交通機関にも多くの混乱が生じた。地下鉄 7 号線江南高速バスターミナル駅付近 (図-4

参照) では、近隣のホテルの駐車場およびバスターミナルで発生した浸水の影響により、地下 1 階の駐車場や地下鉄駅に氾濫水が流入した。地下 1 階の駐車場の最大浸水深は 1.5m 程度であった。また、地下鉄駅に流入した氾濫水は地下鉄軌道にまで達し、氾濫水が滞留した軌道区間は 1.3km にわたった。バスターミナル駅の建物および地下空間に流入した総水量は約 28,000m³ と推定されている。高速バスターミナル駅を含む 7 号線の一部の区間は、7 月 15 日午前 2 時から 17 日午後 6 時まで運休した。

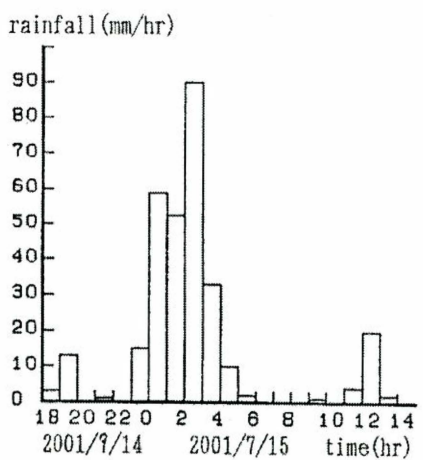


図-3 ソウルの降雨分布

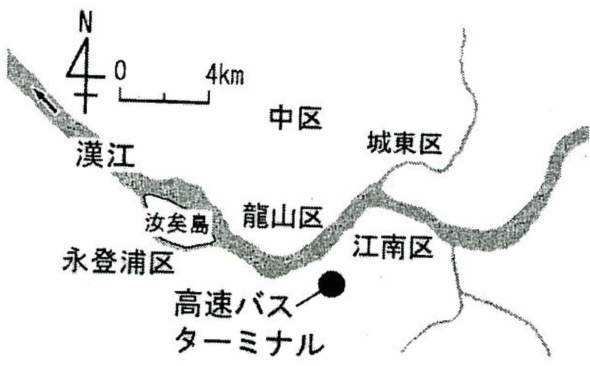


図-4 浸水した駅の位置

3. 地下浸水の水利模型実験

都市水害時の地下浸水を取り扱うにあたり、まずは、地下空間でどのような流況が現れるのか、どのような危険な状況が発生するかを明らかにする必要がある、実在する地下空間を対象として、できるだけ縮尺の大きい水利模型を用いて水利実験を実施した 1)。

3. 1 水利模型実験装置

(1) 対象とした地下空間

実際の地下空間を精緻に再現した縮尺 1/30 の無ひずみの模型を用いた水利実験により、地下空間内の浸水過程を明らかにすることを試みた。京都市内に位置する地下街、地下駐車場、地下鉄駅から構成される地下空間を対象とし、浸水過程を調べる水利実験を行っている。さらに階段部での水理量を計測し、氾濫水の浸入時の流況を避難行動の難しさと関連づけて調べている。また避難の困難性から地下空間の浸水時の危険性を考察している。なお、実験で得られた数値は実物値に換算して表現する。

地下空間は図-5 に示すように 3 層構造で、地下 1 階は東側がショッピングモールと地下鉄駅コンコース、西側が駐車場、地下 2 階は全面駐車場、地下 3 階は地下鉄のホームで構成されている。地下 1,2 階は、平面積が約 650m×40m の長方形で、天井高は 3.5m、また地下 1,2 階とも縦断方向中央部に段差があり、東側は西側より床面が 1.5m 低くなっている。地下 3 階は平面積が約 100m×8m の長方形、天井高は 2.7m で、乗客の乗降時の安全を考えて駅ホームに直立壁が設置されており、電車の発着時のみ扉が開く構造となっている。全階層をあわせた延べ床面積は約 50×10³m²、容積は約 180×10³m³である。

図-6 に地上と地下街との出入口を示す。便宜上、図のように階段に番号を付している。地上と地下 2 階を結ぶ通路は、東端の 2 箇所の車両専用スロープであり、地下 1 階と地下 2 階を結ぶ通路は、西側の 2 箇所の車両専用スロープ (図中の点線) である。地下 3 階の地下鉄ホームは図中の点線で示されているように、地下 1 階コンコースのみと接続しており、地下 2 階とは接続していない。なお、地上と地下を結ぶ通路の幅は 0.8m~6.0m の範囲にある。

(2) 実験装置

図-7 は実験装置の全景で手前側に高水槽が設置されている。ポンプで低水槽から高水槽に送られた水は、配水管を通して各注水口に到達し、そこから地下街へと流入する。流入水は、地下街、地下駐車場内に滞留するものを除き、地下3階ホームから地下鉄軌道へと流出し、低水槽へと排水される。図-8 は地下街模型である。模型はアクリル製で、地下街の階段や柱、壁などの形状を詳細に再現している。なお模型では流況観察や水量の計測のために、地下1,2階部分に天井を設けず、また地下2階を側方(北側)にずらしている。

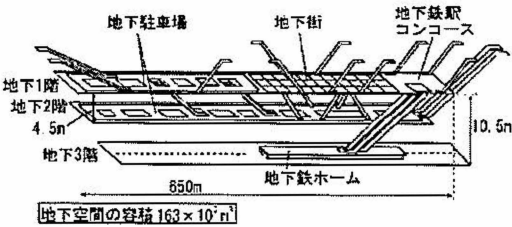


図-5 対象とした地下空間の概要

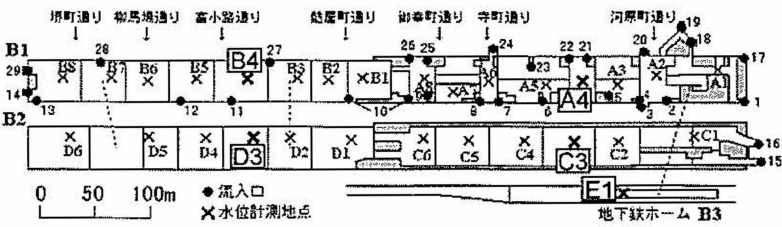


図-6 地下街の出入口と計測地点

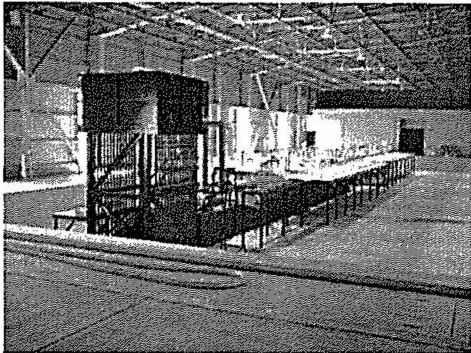


図-7 模型装置

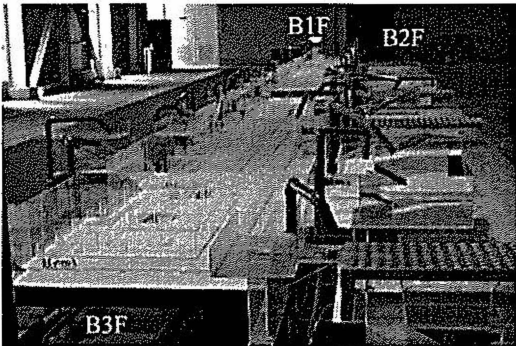


図-8 地下街模型

3. 2 地下浸水過程

(1) 実験方法と実験ケース

地下街につながる階段やスロープ箇所から給水し、地下空間各地点の浸水深の時間変化を計測するとともに、地下鉄軌道からの流出量を把握した。階段やスロープといった流入地点ごとの流量の調整には配水パイプの注水口手前に設けた流量調節バルブを用い、流量の検定には三角堰を用いた。

氾濫水の流入地点や流入口数、流入流量、地下鉄ホームの扉の開閉状態を種々変化させて実験を行った。別途実施した市街地氾濫実験の結果を援用し、市内河川から 100m³/s 溢水する条件下で、地下への流入口、流入流量、流入開始時刻を決定した実験結果を紹介する。流入条件を表-1 に示す。氾濫水が流入口 1 から流入開始した時刻をこのケースの流入開始時刻としている。

(2) 実験結果

地下1階東側中央(A4)、地下1階西側駐車場中央(B4)、地下2階東側駐車場中央(C3)、地下2階西側

表-1 流入条件

流入口番号	流入開始時間	流入流量 [m ³ /s]
1	0	1.58
15+16	6分18秒	14.08
3	10分0秒	1.32
5	10分14秒	2.13
4	10分30秒	1.88
2	10分47秒	2.63
18+19	11分25秒	0.38
6	11分5秒	1.31
17	12分42秒	2.00
7	14分09秒	1.08
9	23分06秒	1.10
10	24分01秒	0.54
8	24分28秒	0.94
11	27分18秒	0.67

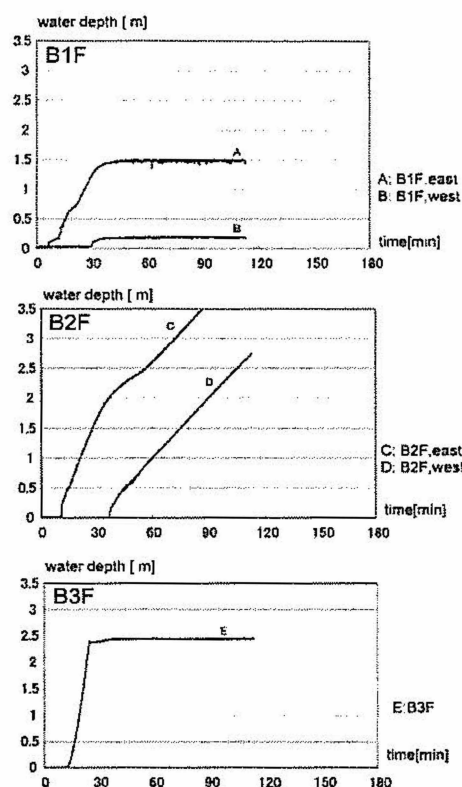


図-9 浸水深の時間変化

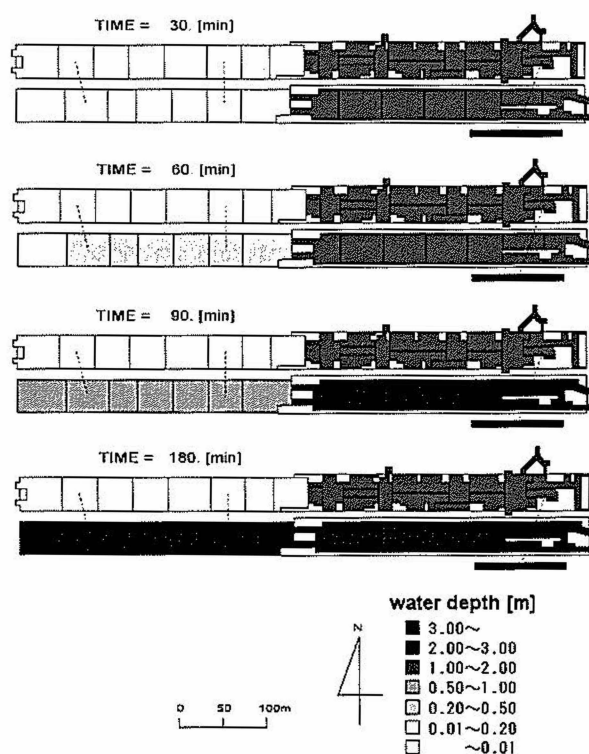


図-10 浸水深図

駐車場中央(D3), 地下3階地下鉄ホーム(E1)での浸水深の時間変化を示す(図-9 参照)。また, 浸水深図(平面図)を図-10に示す。これ以降, 各計測地点は最初のアファベットだけで表現する。まず地下1階では, 流入開始およそ15分で東側(A)の水深が0.5mを超え, 45分後には水深が1.5mに達する。一方, 流入開始30分から地下1階西側駐車場中央付近の流入口からの流入により, 西側(B)での浸水が始まる。しかしながら, そこに流入した水は, より床面高の低い地下2階西側(D)へと連絡通路を通して流出し, 結局地下1階西側(B)は流入開始100分経過後でも水深は最大0.2m程度にとどまる。

一方, 地下2階では, 流入開始8分後には東側の浸水が始まる。流入開始30分後に東側(C)の水深は1.5mとなり, 西側(D)への流出が始まる。西側(D)では地下1階からの流入もあるが, それは東側(C)からの流入量に比べてわずかであるため, 浸水過程にはさほど影響しない。流入開始87分後には地下2階東側(C)の水深は天井高である3.5mに達する。地下3階地下鉄ホームでは, 流入開始12分後に浸水が始まり, 19分後には水深1m, 25分後には水深が2.5m程度となり, 地下鉄軌道への流出が始まっている。

3.3 階段部の流況

地下空間模型の階段部分を用いて, いくつかの代表的な形状の階段部での流速・水深を計測し, 得られた結果をもとに流況と避難行動との関係について考察する。

実験に用いた階段形状の流入口は, エスカレータ, スロープを含む直線形状3種類と折れ曲がり形状2種類の計5種類である。各流入口への流量は地下空間への浸水過程の実験に準じ, 地上の浸水深を越流水深とみなして段落ち式で算出される単位幅流量 q を与えた。

武富ら²⁾は階段を流下する氾濫水が歩行者に与える危険性について実験を行い, 階段上の流速を u , 水深を h として u^2h が $1.5\text{m}^3/\text{s}^2$ 程度を超えると, 足をとられ歩行が困難になるとしている。ここでは避難行動の可能性を調べるための一つの指標としてこの関係を用いることとする。

地上浸水深0.5m相当の流入流量(単位幅流入流量 $0.6\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)を与えた結果が図-11である。本実験の結

果から、階段では地上浸水深が 0.5m を超えると避難困難となることがわかる。

3. 4 浸水時の地下街の危険性

亀井³⁾によると、洪水時には平面部で水深が成人男性で 70cm 以上、成人女性で 50cm 以上、小学校 5～6 年生で 20cm 以上になると歩行困難になるとされている。また武富ら²⁾により、階段部での人間の歩行による避難が困難になる指標が得られている。ここでとりあげた浸水実験結果での地下街平面部と階段部の避難可能性をまとめて示したものが図-12 である。水深 20cm 以上、50cm 以上の箇所を色分けして示し、流入単位幅流量が 0.6m³/s/m 以上になる階段は通行不能として×印を付している。

流入開始 5 分で地下 1 階コンコースが水深 20cm となり、東端の出入口が通行不能となる。10 分後には地下 2 階で浸水が始まり、さらに東端の 2 つの出入口が通行不能となる。15 分後には地下 1 階のショッピングモール中央付近まで浸水が拡大している。水深は 20cm 程度であり、大人であればまだ歩行可能状態にあるものの、地下 1 階の出入口は 6 箇所が通行不能となっており、避難は容易ではない。避難に時間がかかってしまうと、20 分後にはショッピングモール全体で 50cm を超えてしまい、大人でも避難困難な状況に陥ってしまう。また、図-9 に示されるように、地下 3 階ホームでは、15 分後から 20 分後にかけての 5 分間で水深が急激に上昇し、しかも地下 1 階の水深が 50cm 以上となる。したがって地下 3 階からの避難通路となる階段が通行不能となるため、大変危険となる。

4. 地下浸水の予測解析法

4. 1 基礎式および解析手法

地下街のような多層化している地下空間では、地上と同様に地下空間にも汎用解析モデルを適用し、地上からの汎用水の流入を境界条件として設定することにより地下浸水の解析が可能である。複雑な地上部ならびに地下空間をどのようにモデル化するかは、研究者のモデルメイキングの考え方や対象とする場の構造、また扱おうとしている現象により様々である⁴⁾⁵⁾⁶⁾。ここでは著者らの地下浸水解析の原形版ともいえる、貯留槽モデル(ポンドモデル)⁷⁾を用いた比較的簡便な解析手法⁸⁾を紹介する。地上部の浸水解析にも同じ手法を適用し、地上部と地下空間を統合してみる。そして次節で、1999 年に福岡市内で発生した地下浸水への適用結果を示すこととする。

(1) 地下街・地上部の解析手法

図-13 に今回用いたモデルの概念図を示す。地下街は商業スペース、広場、地下鉄改札口、隣接ビルの地階などがつながっている。そこで、各ゾーンを隔てる壁や、地盤高、階層の違いなどによって地下街を複数の領域に分割し、各領域を固有の容積をもった貯留槽と見立てた。これにより、地下街を貯留槽が 3 次元的

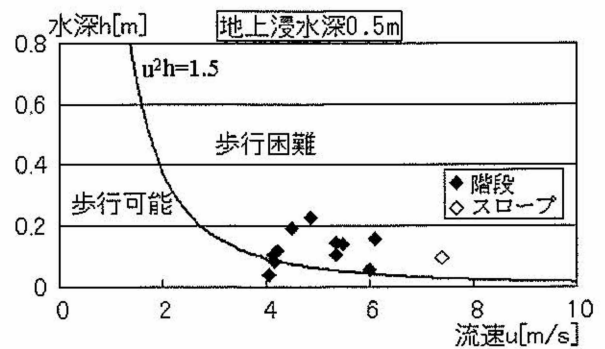


図-11 階段部の避難可能性

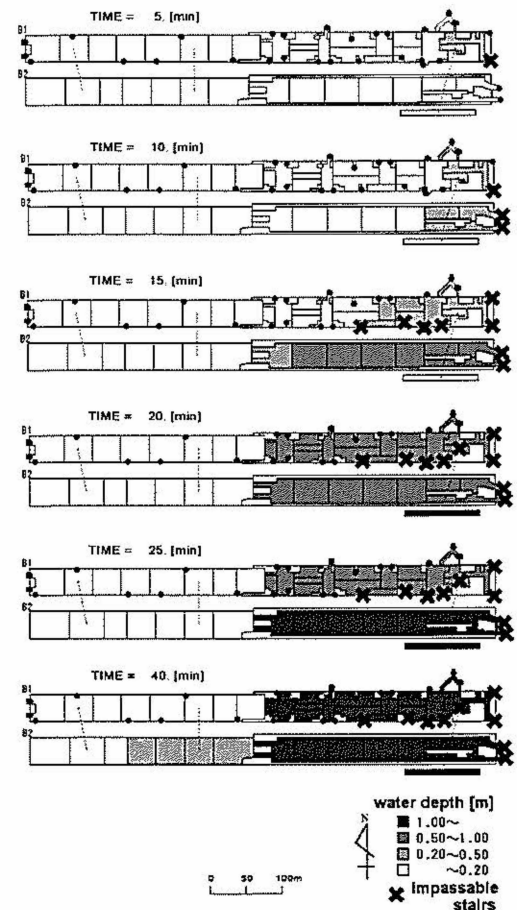


図-12 地下空間からの避難可能性

に連結した空間として考えることができる。地下街内での浸水の拡がり
は、その貯留槽間の流量を求めることで表現することができる。以上の
ような地下街のモデルに、スロットを組み込んだ解析手法を適用した。

地上部にも同様の手法を適用した。ただし、スロットは組み込んでい
ない。この解析手法を用いたのは複雑な地形場に対してもモデル化が比
較的容易であるためである。地下街を有するような地上部は都市化が進
んでいて、とくに市内中心部では道路が網羅している。そこで、おもに
道路で多数の領域に分割し、それらを貯留槽とみなした。

まず、貯留槽間の連続式は、断面積 A_s のスロットを考えることにより
以下のように表す。

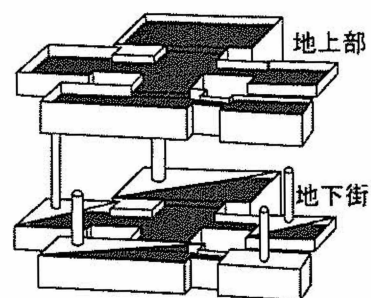


図-13 貯留槽モデル概念図

<連続式>

$$A \frac{dh}{dt} = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_{in} \quad \text{ただし, } A = A_f : h < D, \quad A = A_s : h \geq D \quad (1)$$

ここで、 A : 貯留槽の有効底面積 (実際に水がたまる部分の面積), A_f : 貯留槽の底面積, A_s : スロットの面積,
 h : 水深, t : 時間, Q_i : 貯留槽が有する i 番目の接面から流入する流量, m : 流量の出入りが行われる接面数,
 Q_{in} : 地上や地下街の他の階層などからの流入流量, D : 貯留槽の天井高である。ただし、地上部の解析では、
スロットは用いていないので常に $A = A_f$ となる。

次に、貯留槽間の運動量式は、次式を用いる。

<運動量式>

$$\frac{L}{gA_b} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha L Q |Q| \quad (2)$$

ここで、 ΔH : 隣接した貯留槽間の水位差, Q : 流量, g : 重力加速度, t : 時間, L : 隣接した貯留槽の図心間の
距離, A_b : 接面の断面積である。また、 α は損失係数であり、マンニングの粗度係数 n を用い、次式のように
表す。

$$\alpha = \frac{n^2 s^{4/3}}{A_b^{10/3}} \quad (3)$$

ここで、 s は接面の潤辺である。ここでは井上ら⁷⁾の手法に先端条件を付加した。先端の扱いについては、川
池⁹⁾が地上部で適用した手法を用いた。

(2) 上層と下層の接続

地下街と地下鉄空間とをつなぐ階段や地下街内の地下 1 階と地下 2 階をつなぐ階段、地上部と地下空間と
をつなぐ階段では、上層から下層への氾濫水の落ち込み、あるいは下層が満杯となって氾濫水が下層から上
層に逆流する状態が考えられる。そこで、上下層の水のやり取りについては、以下の解析手法を用いる。

上層から下層へ氾濫水が流入し、かつ下層が管路状態でない場合は下層への流入流量を以下の段落ち式で
求める。

$$Q = B \mu h_0 \sqrt{g h_0} \quad (4)$$

ただし、 B : 流入口の流下幅, h_0 : 上層の水深とした。ここで、 μ は段落ち流れの流量係数である。

下層が管路状態(水位が天井に達している状態)になっている場合、水の移動は上層の水位と下層の水位(スロットの水位)との水位差で行うものとした。流量算出には地下街と地上部の浸水解析で用いた式(2)を用いる。ただし、 ΔH : 上層と下層の水位差、 A_b : 開口部の断面積、 L : 上下層間の床厚である。

4. 2 福岡市の地上・地下空間の浸水解析

(1) 対象領域

図-14 に示すように東を御笠川左岸とする地域を対象領域とした。面積は約 3.2km² である。対象領域は1999 年 6 月の水害による浸水域の実績から決定し、御笠川以外の領域境界では水のやりとりがないものとした。図-15 に地盤高図を示す。これより、御笠川から JR 博多駅に向かって地盤が低くなることがわかる。御笠川からの氾濫水が JR 博多駅方面に流れていくことは容易に想像できる。

図-16 に JR 博多駅地下空間の概要と地盤高を示す。JR 博多駅地下空間は、大きく分けると、JR 博多駅前地下街と地下鉄軌道空間(地下鉄ホームを含む)の 2 つの空間から構成されている。JR 博多駅前地下街は、筑紫口側と博多口側から構成されている。筑紫口側と博多口側は食品市場でつながっている。地下鉄コンコースは 3 箇所、筑紫口側と博多口側、食品市場のさらに下の地下 2 階にある。地下鉄軌道空間は、十分大きな容積を持った貯留槽とした。地下空間の延べ床面積は地下鉄軌道空間を除いて約 5.2×10⁴m² であり、容積は約 16.9×10⁴m³ である。JR 博多駅前地下街を構成する各地下商店街、雑居ビル、地下鉄コンコースの地盤高はそれぞれ異なる。また、地上・地下空間ともに、各格子における面積の有効率を考慮した。面積の有効率とは、それぞれの格子につき、格子の全面積に対して実際に水が溜まる部分の面積の割合である。



図-14 地上の対象領域

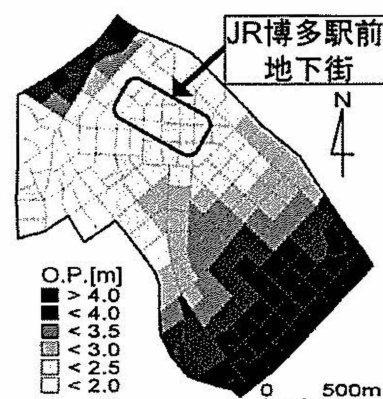


図-15 地上の地盤高図

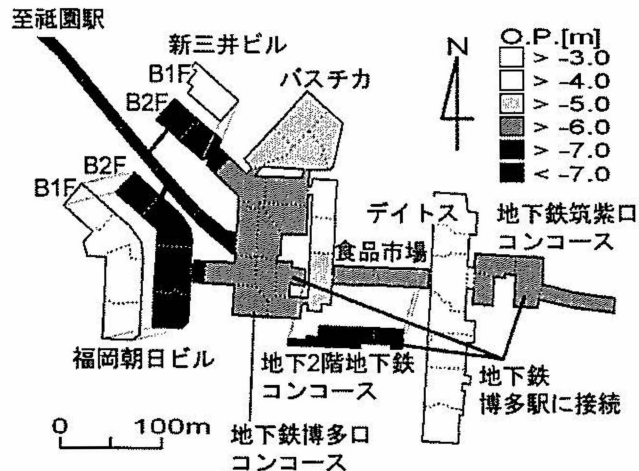


図-16 博多駅地下空間の概要と地盤高

(2) 計算条件

1999 年 6 月の水害への適用を図った。流入流量として、橋本ら¹⁰⁾が求めた越流流量を用いた。図-17 に流入流量の時間変化を、図-18 に流入させる格子を示す。ただし、1 つの格子への流入流量はそれぞれ均等に配分した。計算開始時刻は山王放水路からの越流が始まる 1999 年 6 月 29 日 9:00 とし、計算終了時刻を 13:00 とした。

再現計算にあたっては、下水道による排水(下水道の設計値である 52mm/hr の 7 割に相当する 36.4mm/hr で雨水を排水)、地上の対象領域内にあるビル地階への流入(合計約 6.0×10⁴m³)、デイトスの地下貯水槽(容量約 1.3×10⁴m³)への貯留、歩道から地下街入口への段差および車道と歩道の段差(合計 30cm)を考慮した。

マンニングの粗度係数は、地上では $n=0.067$ とし、地下街は $n=0.030$ とした。段落ち式の流量係数 μ は 0.544 とした。計算時間ステップ Δt は 0.05s, スロットの面積は、有効率を考慮した格子面積の 2% とした。

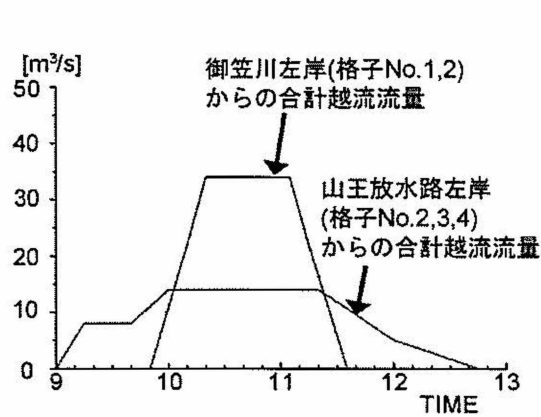


図-17 流入流量の時間変化

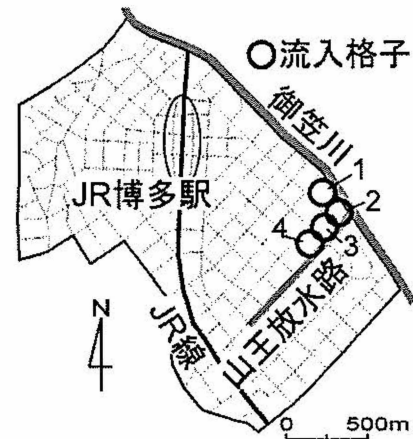


図-18 流入格子

(3) 計算結果と考察

図-19 に JR 博多駅地下空間の最大浸水深の計算結果と水害時の浸水実績を示す。最大浸水深図と実績の浸水域を比較すると、筑紫口側（東側）の浸水域はおおむね一致していることがわかる。博多口側（西側）において、実績では浸水しているが計算結果では浸水していない箇所が見られるが、実績の水深は 5cm 未満と小さいものである。また、食品市場、地下 2 階地下鉄コンコースで計算結果と実績の不一致が見られる。

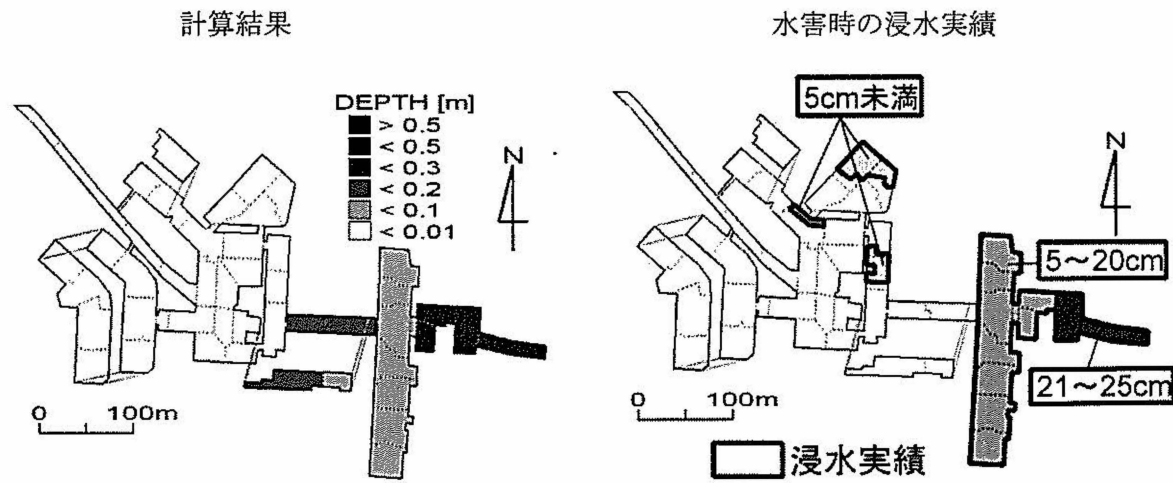


図-19 博多駅地下空間の最大浸水深図

これは食品市場の上方に位置する JR 博多駅コンコースにおいて、水害時に地下街・地下鉄に接続する階段の止水対策がとられたためと考えられる(橋本らの調査結果¹¹⁾ 参照)。地下鉄軌道空間に流入した水量は計算終了時点(13:00)では約 5,000m³ であり、実績値では約 1,000m³~2,000m³ といわれている。

図-20 に地上の最大浸水深図および 1999 年 6 月水害時の浸水域の実績を示す。浸水域の実績は橋本らの調査結果¹¹⁾ を用いた。計算結果と実績の浸水域はおおむね一致しているといえる。計算結果の最大浸水深は JR 線の東側で大きく、西側で小さい。これは、JR 線に盛土があるため、東側と西側の氾濫水のやりとりが高架下の道路を通じてしか行われないことが一因と考えられる。

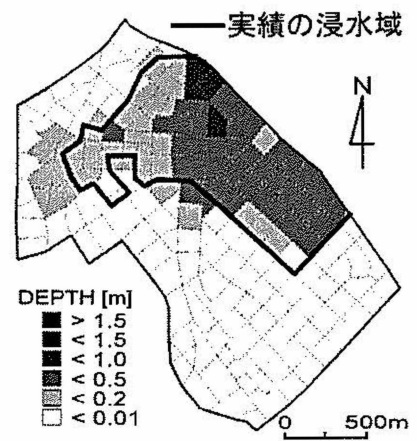


図-20 地上の最大浸水深図

全般に、計算結果は実績とおおむね一致した。とくに JR 博多駅地下空間の筑紫口側の浸水域および水深は実績と比較的よく一致したといえる。しかし、地下鉄への流入量が計算結果と実績で一致するまでに至っていない。この原因として、今回考慮した下水道による排水、地上の対象領域内にあるビル地階への流入、デイトスの地下貯水槽への貯留、JR 博多駅前地下街入口に設置された段差の評価方法の精度の問題が考えられる。

5. 地下空間の浸水時の避難限界

5. 1 階段、ドアからの避難限界

浸水時には地下空間内で水深が上昇し、平面部では歩行が困難になる。またドアが閉まっている部屋にいて、いざ開けようとしてもドア前面の水圧によって開けるのは容易でない。また避難経路である階段からは氾濫水が流下してくるため、階段からの避難は困難を強いられる。

地下浸水時の避難を考えるにあたって、いったいどのような状況のときが人間の避難の限界であるかをまずは正しく理解する必要がある。その目的のために実物大模型を用いた体験実験¹²⁾ を行っている。図-21 に示すような、幅だけを 1m に縮小した高さ 3m (段数 20 段) の実物大の階段模型を用い、地上の浸水深を変化させた条件下で歩行による避難限界を調べている。すなわち、前出の武富らの実験を、階段数を実際のものに合わせた条件で再確認している。



図-21 実物大の階段模型による避難実験

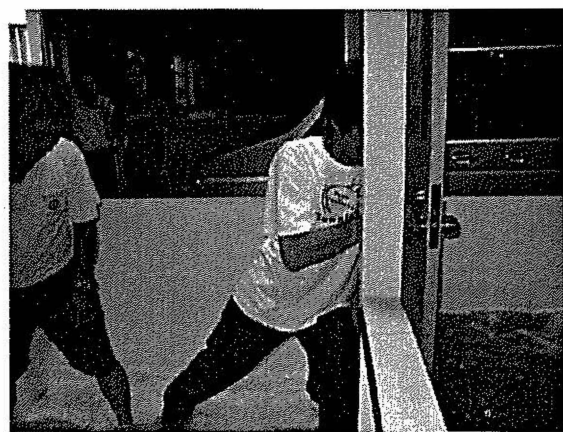


図-22 実物大のドア模型による避難実験

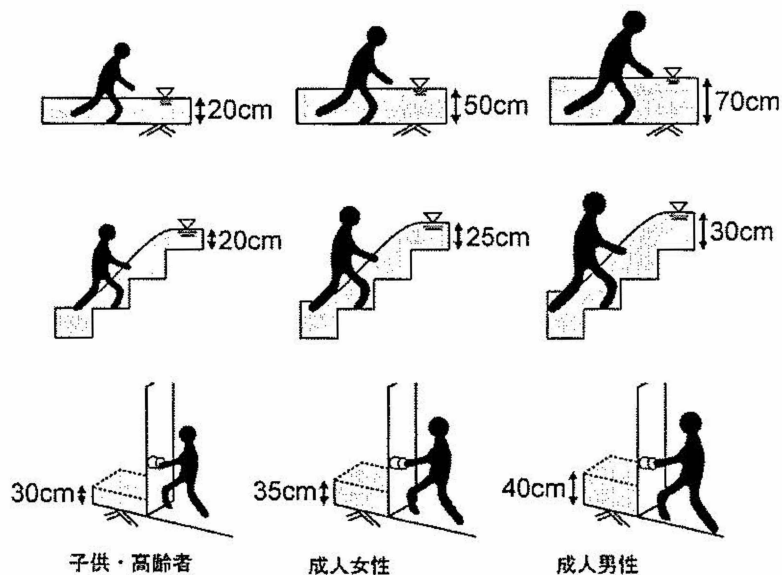


図-23 地下浸水時の避難限界指標

実験の結果、地上水深が 30cm 相当での流入流量で成人が階段を上れる限界状況となることが明らかとなった。このとき、階段を流れ落ちる水流の速さは最大で 4m/s に達している。さらに、服装、履物の種類や周囲の状況（停電や混雑の度合い）によっては、この避難限界値を下回ることも十分予想される。

また、図-22 に示すような実物大の押し開きのドア前面の水槽に水を貯め、水深を変化させて被験者がドアを押し開けられるかどうかを調べている¹²⁾。実験の結果、水深 35cm で成人女性が、そして 40cm を超えると成人男性でもドアを開けることが困難となる。

これまで実施してきた実験結果ならびに参考文献³⁾を援用して平面部、ドア部、階段部で図-23 のような避難限界指標を設定している。

5. 2 半水没した車からの避難限界

氾濫水が地下駐車場や道路・鉄道下のアンダーパスに浸入した際には、車から人が脱出できない事態が発生する。2008 年 8 月には栃木県鹿沼市のアンダーパスで自動車浸水事故が発生し、不幸にも 1 名が亡くなっている。

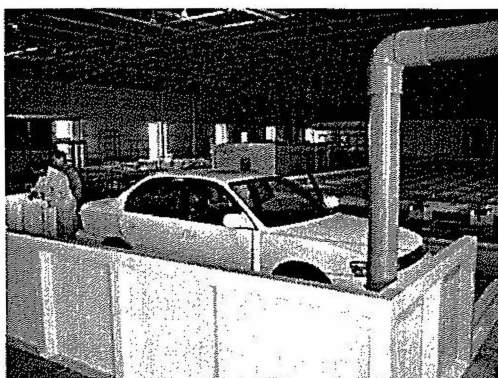


図-24 実物大の車模型と水槽



図-25 実物大の車模型による避難実験

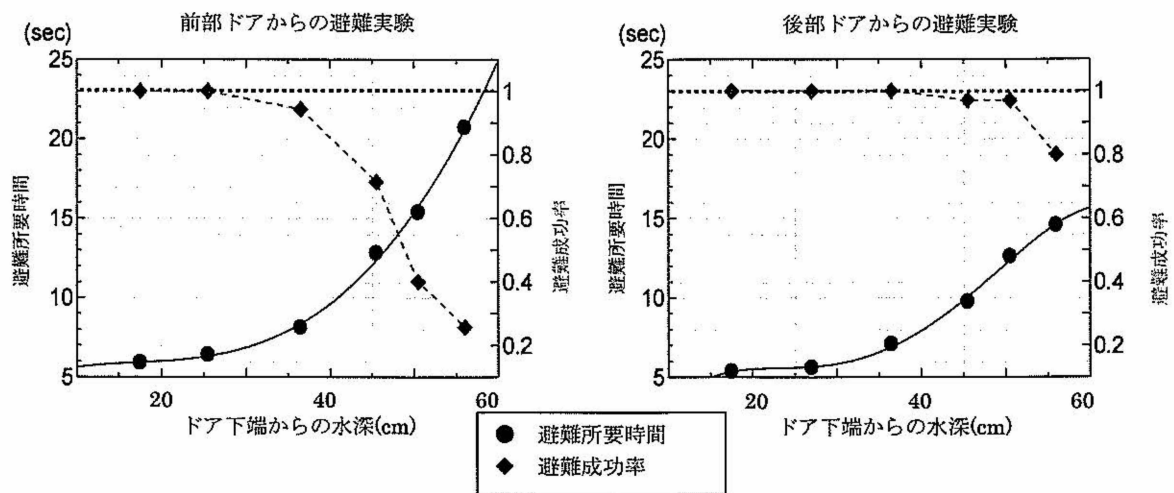


図-26 前部ドアおよび後部ドアからの避難所要時間と成功率

地下駐車場やアンダーパスで浸水した車から避難するという事態は十分起こりえるものであり、浸水した車からの脱出がどれほど困難かを明らかにするために、押し開けドアを有する実物大の車模型を用いた体験型の避難実験を行った¹³⁾。

図-24 のような水位を調節できる水槽の横に実物大の車を設置して、様々な水深に対して被験者が車から脱出する際の難しさについて検討した。実験の様子を図-25 に示す。水深の上昇につれて自動車のドアに作用する水圧が増大し、押し開けが困難になる。さらに、座位での押し開けであり、立位の場合に比して発揮できる力は小さくなる。図-26 は、成人男性 35 名の体験者による結果をまとめたものである。図の横軸は、ドア下端を基準とした水深であり、これに 32cm を加えると地面からの水深となる。図より、前部ドアからの避難の方が、所要時間が長く、浅い水深で避難成功率が下がっている。これは、ドアの大きさによる全水圧の違いが原因であり、前部ドアからの避難が後部ドアよりも難しいことを示している。実験結果より、地面からの水深が 80cm を超えると前部ドアの押し開けが困難になることがわかる。なお、この結果は、車種を変えてスライドドアで行ってもほぼ同じであった¹⁴⁾。さらに、水没した車から何とか避難したとしても、水深の大きい条件下での避難を考えると、その後の歩行避難も難しい。

これらの実験結果は、万一、車が浸水して水没した際には、直ちに避難を開始することが何よりも重要であることを私達に再認識させるものである。

6. 地下浸水対策

地下浸水を防ぐには、地上での氾濫が起こらないようにすることが基本であるが、最近の頻発する豪雨を踏まえて、低平地の都市部では、地下浸水対策も並行して進めていく必要がある。都市水害対策を市街地（地上部）と地下空間に分けて考えることとし、それぞれ、構造物などの施設によるもの（ハード的対策）と施設によらないもの（ソフト的対策）について考えてみる。もっとも、様々な方策を組み合わせた総合的な対応が必要なことは言うまでもない。

6. 1 市街地の水害対策

(1) ハード的対策

外水氾濫に対しては、まずは都市を流れる河川の治水安全度を再点検し、河川から水が溢れないような整備を図ることが第一である。分水路や地下河川といったバイパス機能をもつ施設の設置が望ましいが、整備

には莫大な経費と時間を要するため、現実には、流域全体を見すえて洪水に対応する保水・遊水施設を適切に配置していくことが望まれる。

内水氾濫対策では、雨水排除のための下水道整備が最重要であるが、下水道網やポンプの排水能力の向上だけでなく、一旦雨水を貯留する大小様々な規模の雨水貯留施設を併用することを考える必要があろう。流域一帯が低平地の都市流域では、河川、下水道を分離せずに、流域全体を対象として河道での洪水処理、雨水排除、雨水貯留を総合的に考えていかねばならない。

(2) ソフト的対策

シミュレーション解析により、洪水氾濫がかなり精度よく予測できるようになってきている。この技術をもとに、市内を流れる河川からの氾濫および内水氾濫を想定した「都市水害ハザードマップ」を作成し、住民に地下空間を含む氾濫危険箇所ならびに避難を含めた水害時の対処法を知らせておくことが重要である。道路や高架下のアンダーパスも、当然、危険箇所に含まれる。

6. 2 地下浸水対策

過去に水害を被った地域や都市水害ハザードマップから氾濫の危険性が予想される地域に位置する地下空間では早急な対応が望まれる。

(1) ハード的対策

先ず、階段などの地下への入口に止水板を設置したり、通路面よりも高くした段差（ステップ）を設置したりすることが考えられる。土のうによる対応もこれに含まれる。地上の浸水深がこれらの高さまでであれば流入を防ぐことができるとともに、これらを超えた浸水が生じたとしても、浸水量を減らし、かつ浸水を遅らせる効果が期待できる。

また、ビルの地下室には電気系統設備、情報通信設備などが集中しているが、それらについてもかさ上げを行ったり、材質に配慮したりして、耐水性、防水性に十分注意を払う必要がある。

(2) ソフト的対策

都市水害ハザードマップに、地下空間の浸水想定も含めた地下浸水の危険性に関する情報を加えておき、地下空間で働く人達、地下空間を利用する人達に地下浸水の危険性を認識してもらう必要がある。

地下浸水が起こりそうな場合や、万一、地下浸水が起こった場合は、速やかに地下から逃げだすことが何よりも大切である。そのためには地下への情報伝達と避難システムの整備が重要となる。地下空間では地上で何が起こっているかわからないことが多く、災害の観点からは情報過疎になりがちである。地下街ならびにオフィスビルなどの地下空間では、気象情報や河川情報および地上での状況が一元的に地下にも伝達され、地下施設の管理者・関係者がいち早く対応できるシステムづくりを進めることが急務である。

避難については、地上への避難経路を決めておき、地上への出口までの避難経路図や避難指示機器をわかりやすいものにしておくこと、浸水時の停電に備えて非常用の電源を確保しておくことが重要である。

小規模な地下空間である、ビルの地下室、地下駐車場や一般家屋の地下室は、床面積が小さいため水位の上昇が速いので浸水時の危険性はさらに深刻である。ビルの地下室、地下駐車場では、複数の避難経路や、建物の2階以上の場所への避難策などを考えておく必要がある。場合によっては、緊急用の梯子などの設置も検討の必要があろう。最小規模の一般家屋の地下室では、「地上が氾濫する事態になったときには、地下には決して近づかない」ということを徹底しておく。

鉄道や道路の高架下のアンダーパスでは、浸水時の車の進入防止策を徹底するとともに、万一の際の脱出に備えて、ドライバーはハンマーなどを常備しておく必要があろう。

加えて、消防や警察といった行政の守備範囲となるが、万一、地下浸水で水難事故が発生した際に、いかに被災者を救助するかも重要となる。浸水した地下室や車に取り残された被災者の救助法の検討や、それに対する訓練も必要となってくるであろう。

7. おわりに

気候変動やヒートアイランド現象の影響により、今後も都市水害は頻発すると予想される。外水氾濫だけでなく、短時間豪雨による内水氾濫であっても、地下空間で人の命が失われる危険性が潜んでいるということを決して忘れてはいけない。地下空間をとりまく環境に細かな注意を払うことが災害予防の基本線であることを、肝に銘じておくべきである。

謝辞

ここでは、著者が、京都大学防災研究所ならびに関西大学の研究者と共同で実施してきた都市水害時の地下浸水に関する研究成果を紹介した。共同研究者である、京都大学の井上和也名誉教授、京都大学防災研究所の中川一教授、馬場康之准教授、川池健司准教授、そして関西大学の石垣泰輔教授にこの場を借りて謝意を表する。

参考文献

- 1) 戸田圭一・井上和也・大八木亮・中井勉・竹村典久：複雑な地下空間の浸水実験，水工学論文集第 48 巻，土木学会水工学委員会，pp.583-588, 2004.
- 2) 武富一秀・館健一郎・水草浩一・吉谷純一：地下空間へ流入する氾濫水が階段上歩行者に与える危険性に関する実験，第 56 回土木学会年次学術講演会講演概要集第 2 部，pp.244-245, 2001.
- 3) 亀井勇：台風に対して，天災人災住まいの文化誌，ミサワホーム総合研究所，1984.
- 4) 関根正人・河上展久：都市域における内水氾濫と地下鉄駅に接続する地下空間の浸水に関する数値解析，水工学論文集第 49 巻，土木学会水工学委員会，pp.595-600, 2005.
- 5) 関根正人：複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水過程と避難誘導に関する数値解析，水工学論文集第 54 巻，土木学会水工学委員会，pp.907-912, 2010.
- 6) 井上知美・川中龍児・石垣泰輔・尾崎平・戸田圭一：内水氾濫による大規模地下街の浸水過程と避難の安全性に関する検討，水工学論文集第 55 巻，土木学会水工学委員会，pp.S_973-S_978, 2011.
- 7) 井上和也・戸田圭一・川池健司・栗山健作・大八木 亮：地下空間における浸水過程の解析について，京都大学防災研究所年報 第 45 号 B，pp.173-184, 2002.
- 8) 間畠真嗣・戸田圭一・大八木亮・井上和也：都市域の地上・地下空間を統合した浸水解析，水工学論文集第 49 巻，土木学会水工学委員会，pp.601-606, 2005.
- 9) 川池健司：都市における氾濫解析法とその耐水性評価への応用に関する研究，京都大学博士論文，2001.
- 10) 橋本晴行・朴崎璨・渡辺政広：1999 年 6 月福岡水害時に発生した博多駅周辺の洪水および氾濫流の再現計算，自然災害科学 21-4，pp.369-384, 2003.
- 11) 橋本晴行・松永勝也・南里康久：1999 年 6 月福岡水害における氾濫水の挙動と水害体験者の対応・意識，自然災害科学 20-1，pp.43-58, 2001.
- 12) 石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川一：実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する実験的検討，水工学論文集第 50 巻，土木学会水工学委員会，pp.583-588, 2006.
- 13) 馬場康之・石垣泰輔・戸田圭一：水没した自動車からの避難の難しさ，京都大学防災研究所年報第 53 号 B，pp.553-559, 2010.
- 14) 馬場康之・石垣泰輔・戸田圭一：水没した自動車からの避難の難しさ（その 2），京都大学防災研究所年報第 54 号 B，pp.465-470, 2011.